Versuche über die longitudinale reversible Magnetisierung.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
einer Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

Vorgelegt
von
Jürgen v. Harlem
aus Schwerin i. Mckl.

Druckerei H. Schwarz, Königsberg Pr., Kai 13.

1931

Referent: Prof. Dr. W. Gerlach
Dekan: Prof. Dr. H. Geiger

Tag der mündlichen Prüfung 23. Juli 1931.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Problemstellung.

Wegen der Erscheinung der Hysteresis sind im allgemeinen alle Magnetisierungsvorgänge irreversibel. Es ist aber nach Rayleigh doch möglich, reversible Vorgänge zu finden, solange man die Änderung der Magnetisierung durch kleine Änderungen des Feldes beschränkt. Geht man von einem Punkt P des jungfräulichen Astes der Magnetisierungskurve durch Verminderung des Feldes um $\triangle H$ rückwärts und dann wieder um $\triangle H$ vorwärts, so kommt man, solange $\triangle H$ hinreichend klein ist, zu dem Punkt P zurück, sooft man auch diesen Vorgang wiederholt. Der Quotient $\triangle I/\triangle H$ ist innerhalb dieses Bereiches konstant, also feldunabhängig. $\triangle I/\triangle H$ bezeichnet R. Gans als die longitudinale reversible Suszeptibilität.[1])

Für jeden Punkt der Hysteresisschleife kann so die reversible Suszeptibilität gemessen werden. Nach R. Gans ist die reversible Magnetisierung (r.M.) mit ziemlicher Annäherung als reine Funktion der Magnetisierung darstellbar. In Parameterform läßt sich die Kurve angeben durch

$$\text{I)}\quad \frac{I}{I_\infty} = \text{Cotg. } x - \frac{1}{x} = L(x) \qquad \frac{Kr}{3\,Kr^0} = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{\text{Sin}^2\, x} = L'(x)$$

wo I_∞ die Sättigungsintensität, Kr^0 die reversible Suszeptibilität im Punkte I=O ist.

Messungen von G. J. Sizoo[2]) und R. Goldschmidt[3]) (die allerdings mit einer Wechselstrommethode ausgeführt wurden), zeigen jedoch, daß auch wesentliche Abweichungen von diesem Gesetz auftreten können und daß auch die reversible Magnetisierung Hysteresis zeigt, d. h. daß die reversible Suszeptibilität auch davon abhängig ist, auf welchem Teil der Hysteresiskurve sie gemessen wurde.

Zur Vergrößerung des bisher nur spärlich vorhandenen Materials wurden zwei Fälle eingehend untersucht: die longitudinale reversible Suszeptibilität für kristallisiertes Eisen, bei welchem sich sehr kleine oder auch anomale Hysteresisverluste ergeben hatten, und die Frage, ob auch bei Variation der Magnetisierung durch die Temperatur die Gans'sche Beziehung noch gültig ist.

[1]) Ann. d. Phys. Bd. 27, S. 1, 1908; Bd. 29, S. 301, 1909; Bd. 33 S. 1065, 1910. Phys. Z. S. 12, S. 1053, 1911.

[2]) Ann. d. Phys. Bd. 3, S. 270. 1929.

[3]) Z. f. Techn. Phys. Bd. 11, S. 8. 1930. Phys. Z. S. 31, S. 1058. 1930.

1. Teil: Reversible Magnetisierung bei Polykristallen.

Im folgenden sollen die Messungen an Polykristallen dargestellt werden. „Ein Polykristall ist ein Konglomerat von mehr oder weniger großen einheitlichen Kristallstücken. Die aufeinanderfolgenden Kristalle sind meist bezüglich der Oberfläche gleich orientiert, nur um ihre Achse verdreht."[4])

§ 1. Versuchsanordnung.

Gemessen wurde magnetometrisch mit einem astatischen Magnetometer, dessen Empfindlichkeit durch einen Richtmagneten nach Belieben verändert werden konnte. Vor jeder Messung wurde das Magnetometer geeicht. Die Einwirkung der Meßspule wird durch eine zweite Spule kompensiert, auf diese Weise ist es möglich, gleichzeitig die spezifische Magnetisierung der Volumeneinheit I und r. M. zu messen. Die Feldänderung geschah durch Schwächung des äußeren magnetisierenden Feldes um 1,028 Gauß mit Hilfe eines Schiebewiderstandes. Alle Änderungen der Magnetisierung waren absolut reversibel und reproduzierbar, auf beiden Hälften der Magnetisierungskurve identisch. Auf dem absteigenden Ast mußte jedoch bei den Polykristallen die Feldänderung erst mehrmals wiederholt werden. Bei Verkleinerung des Feldes um $\triangle H$ nimmt der Magnetismus hier stärker ab, als er nachher bei Vergrößerung des Feldes um denselben Betrag $\triangle H$ wieder zunimmt. Nach drei bis viermaliger Variierung des Feldes sind die Vorgänge aber tatsächlich reproduzierbar reversibel geworden. Diese Erscheinung zeigt deutlich, daß bei Kristallen die Remanenz sehr labil ist. Da die Proben nicht ellipsoid-förmig waren, wurden zur Scheerung die Endmagnetisierungsfaktoren nach Mann[5]) mit der Korrektur nach Benedicks[6]) benutzt. Alle Messungen wurden nachts ausgeführt, um vor magnetischen Störungen möglichst frei zu sein.

Figur 1.

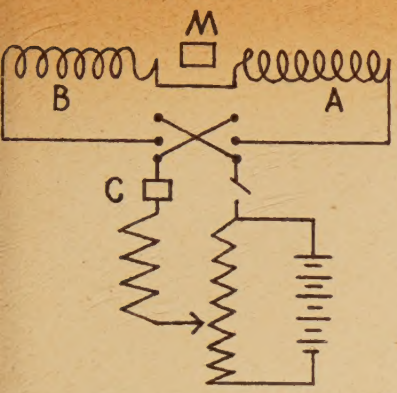
Die Ablesegenauigkeit mit Spiegel und Fernrohr betrug 0,1 Skalenteil, die reversible I-Aenderung bei Kristallen 10—16 Skalenteile maximal. Bei der graphischen Darstellung ist die Parameterdarstellung (K_r/K_{r0} als Funktion von I/I_∞) benutzt. Die gestrichelte Kurve ist die aus I) nach Gans berechnete. I_∞ wurde nach den Messungen von Gerlach zu 1710 gesetzt. Die mit einem Kreuz bezeichneten Punkte sind auf dem absteigenden Hysteresisast gemessen.

§ 2. Die reversible Magnetisierung bei Polykristallen.

Bei Voruntersuchungen am polykristallinem Eisen, das als Ausgangsmaterial für die Kristalle diente, erhielt ich die Kurvenform

[4]) W. Gerlach: Z. S. f. Phys. 38, S. 828. 1926.
[5]) B. Mann: Phys. Rev. 3, S. 359, 1896.
[6]) C. Benedicks: Ann. d. Phys. 6, S. 726, 1901.

Apparatur



A: Meßspule

B: Kompensationsspule

C: Amperemeter

M: Magnetometer

Fig. 1.

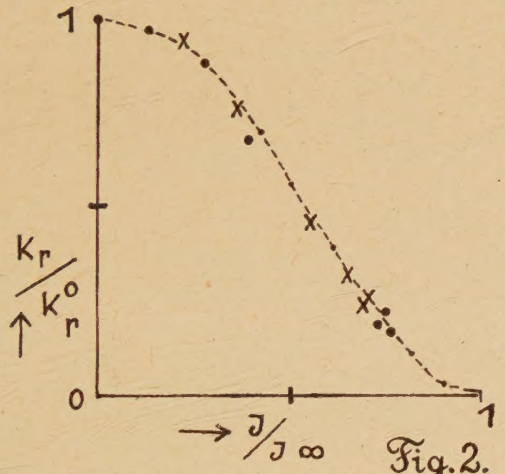


Fig. 2.

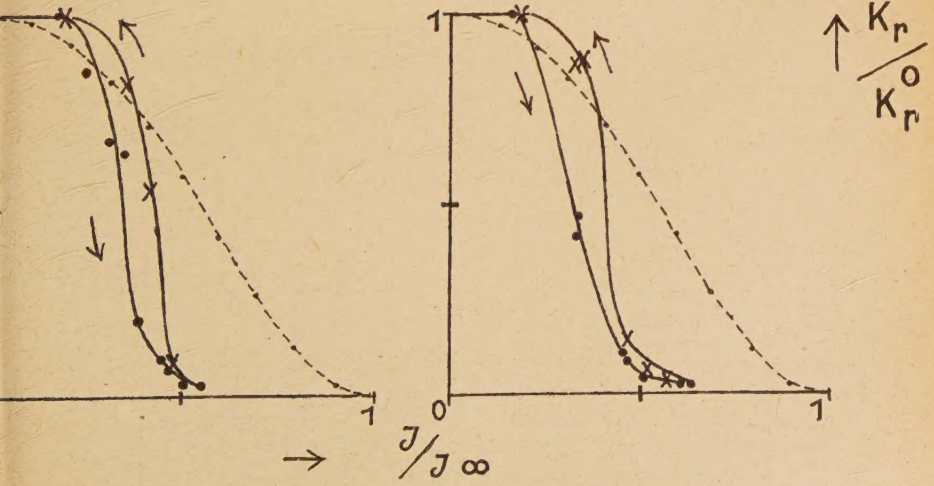


Fig. 3.

nach Gans, ohne das eine Hysteresis innerhalb der Meßgenauigkeit gefunden werden konnte. Da der Maximaleffekt hier nur 3—4 Skalenteile betrug, ist die Meßgenauigkeit natürlich geringer. Die Punkte streuen daher auch mehr.

Die Daten der untersuchten Eisenprobe waren:
$\varnothing$ = 0,499 cm, Länge = 24,85 N^* = 0,0205, Kr^0 = 14,45.

Figur 2.
Tabelle 1

$N\triangle I$	$\triangle Ho$	I/I_∞	Kr/Kr^0
0,197	0,831	0,132	0,968
0,194	0,834	0,135	0,954
0,183	0,845	0,269	0,885
0,147	0,881	0,387	0,684
0,053	0,975	0,746	0,222
0,046	0,982	0,726	0,193
0,041	0,987	0,759	0,171
0,058	0,970	0,695	0,243
0,062	0,966	0,700	0,262
0,075	0,953	0,646	0,323
0,076	0,952	0,628	0,330
0,104	0,924	0,552	0.461
0,162	0,866	0,366	0,765
0,192	0,836	0,222	0,935

Kr^0 = 14,45

Zunächst wurden dann zwei analoge Polykristalle untersucht:

Bezeichnung	Länge	$\varnothing$	N	Kr^0
N. K. I.	25,9 cm	0,45 cm	0,017	174,6
N. K. II.	25,6 „	0,46 „	0,0177	166,8

Die Kurven der r. M. zeigen hier ganz deutlich die Hysteresis in derselben Art wie Sizoo und Goldschmidt sie fanden. Die für absteigende Hysteresisäste gefundenen Kurven der r. M. sind kongruent.

N^* = Endmagnetisierungsfaktor.

Nur die Breite der Schleife und die Anfangssuszeptibilität sind individuell verschieden. Der Abfall der Kurve ist ein viel schnellerer als der der normalen Kurve I.

Figur 3.

Tabelle 2.

N. K. I.

$N\triangle I$	$\triangle Ho$	I / I_∞	Kr / Kr^0
0,769	0,259	0,170	1
0,384	0,644	0,397	0,201
0,237	0,797	0,447	0,101
0,173	0,855	0,461	0,068
0,128	0,900	0,502	0,048
0,096	0,932	0,555	0,035
0,096	0,932	0,562	0,035
0,128	0,900	0,521	0,048
0,218	0,810	0,476	0,091
0,256	0,772	0,462	0,112
0,641	0,387	0,416	0,558
0,731	0,297	0,355	0,836
0,769	0,259	0,182	1
0,737	0,291	0,250	0,853
0,686	0,342	0,317	0,678
0,673	0,355	0,348	0,638

$Kr^0 = 174{,}6$

Auch wenn nicht vorher entmagnetisiert worden war, erhält man die Schleife in ganz derselben Weise. Beide Kristalle zeigen die bekannte Magnetisierungskurve der Polykristalle mit sehr geringer Koerzitivkraft* (0,29 bezw. 0,238 Gauß).

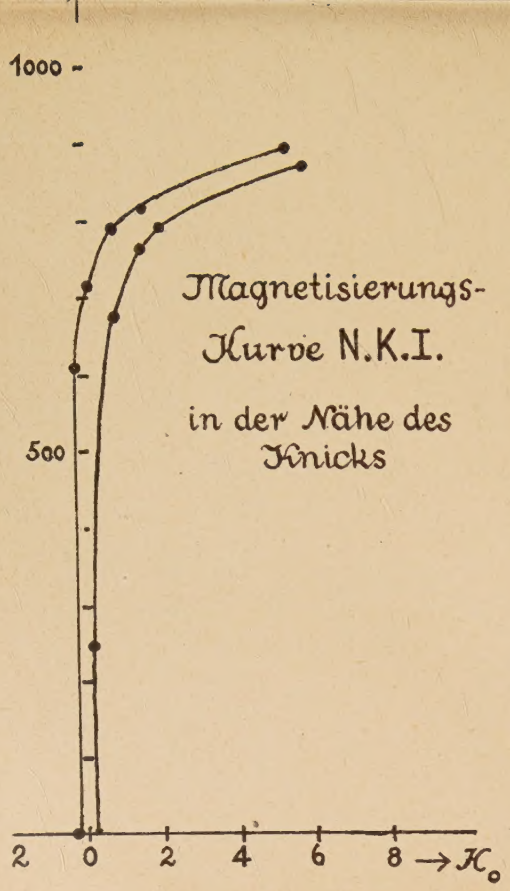
Figur 4.

Ferner wurde ein durch Kaltbearbeitung verfestigter Polykristall untersucht:

Länge = 14,22 cm, ∅ 0,42 cm , N. = 0,046, Kr^0 = 55,7

Seine Kurve der r. M. zeigt keine Hysteresis. Der Anfangswert Kr^0 ist bedeutend kleiner als bei andern Kristallen.

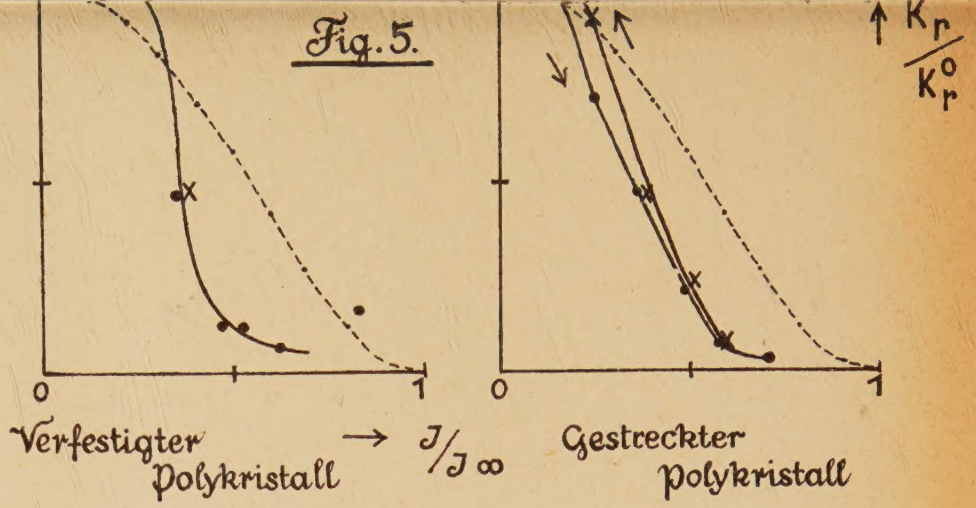
* W. Gerlach, l. c.

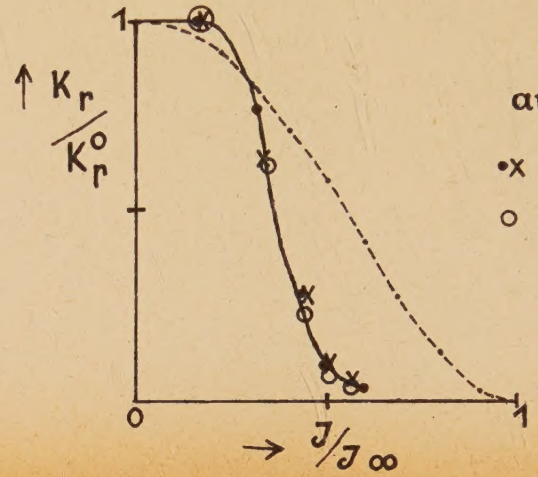


Magnetisierungs-
Kurve N.K.I.
in der Nähe des
Knicks

Fig. 4.

Fig. 5.





N.K.I.
ausgeglüht.

•x sofort

o Nach Ruhepause

Fig. 6.

Figur 5.

Schließlich wurde noch an einem Polykristall, welcher nach einer Streckung von 2,5% kristallisiert wurde, gemessen.

Länge = 20,5 cm, ∅ 0,42 cm, N = 0,214, Kr^0 = 108,4.

Hier tritt bei der r. M. deutlich erkennbar Hysteresis auf. Die Krümmung des absteigenden Astes ist kleiner geworden.

Die Magnetisierungskurve beider Kristallen zeigt keine auffallende Gestalt.

§ 3. Diskussion der Ergebnisse.

Nach dem Gans'schen Gesetz 1) soll die r. M. eine universelle Funktion der Magnetisierung sein, die Kurvenform also unabhängig von der Vorgeschichte des Materials, d. h. von der Form der Magnetisierungskurve. Nur für die Größe der Anfangssuszeptibilität Kr^0 kann die Vorgeschichte maßgebend sein. Vorstehende Untersuchungen jedoch zeigen, daß das Gesetz bei Polykristallen wie bei den von Sizoo und Goldtschmidt untersuchten Proben nicht erfüllt ist.

Bei allen magnetometrischen Messungen besteht allerdings immer die Gefahr, daß bei der notwendigen Scheerung ein falscher Entmagnetisierungsfaktor benutzt wird, wodurch ein ganz anderer Kurvenverlauf vorgetäuscht wird. Um den Einfluß des Entmagnetisierungsfaktors auf die Kurvenform ermitteln zu können, maß ich am Ausgangsmaterial, dessen r. M. ja dem Gesetz von Gans gehorchte, diese bei verschiedenen Längen des Stabes und erhielt dabei immer die gleiche Kurve unter Benutzung der Mann-Bennedicks'schen Werte. Ein so weitgehender Einfluß des Entmagnetisierungsfaktors kann also nicht vorliegen. Auffallend ist, daß Kristalle „scheinbar gleicher Güte Kurven der r. M. besitzen, deren aufsteigende Äste kongruent sind, es muß also ein Einfluß der Güte des Kristallbaues vorliegen. Mechanisch beanspruchte Kristalle weisen wieder andere Abweichungen von der Theorie auf.

Daß die Güte des Kristalles sehr maßgebend ist, folgt eindeutig auch aus der Tatsache, daß durch thermische Vorbehandlung eine Kurvenänderung zu erreichen ist. Ich glühte den mit den N. K. I bezeichneten Kristall unter Stickstoff bei 800° 8 Stunden und kühlte ihn dann verhältnismäßig rasch ab. Nach dieser Behandlung zeigte seine r. M. eine Kurve ohne Hysteresis mit bedeutend niederem Kr^0 (58,9), die mit keiner anderen Kurve kongruent ist, sondern sozusagen durch Kontraktion der Schleife entstanden ist. Als ich nach einer Ruhepause von einigen Wochen die Kurve noch einmal aufnahm, war Kr^0 gestiegen (auf 85,9), der Kurvenverlauf im übrigen unverändert geblieben. Auch die r. M. zeigt somit Alterungserscheinungen, aber nur in ihren Absolutwerten, nicht in ihrer funktionalen Abhängigkeit von der Magnetisierung. Diese Abweichung beruht offenbar auf der bei der Behandlung vor sich gegangenen Gasaufnahme.

Figur 6.

Tabelle 3.

Ausgeglühter Polykristall N. K. I

$N\triangle I$	$\triangle Ho$	I / I_∞	Kr / Kr^0
0,514	0,514	0,161	1
0,446	0,582	0,308	0,766
0,229	0,799	0,426	0,286
0,114	0,914	0,485	0,099
0,039	0,989	0,585	0,040
0,057	0,971	0,565	0,059
0,114	0,914	0,501	0,099
0,229	0,799	0,439	0,286
0,400	0,628	0,327	0,639
0,514	0,514	0,177	1

$Kr^0 = 58{,}9$

nach der Ruhepause

0,610	0,418	0,163	1
0,493	0,535	0,321	0,631
0,252	0,776	0,441	0,223
0,115	0,913	0,494	0,086
0,046	0,982	0,573	0,032
0,046	0,982	0,575	0,032
0,110	0,918	0,500	0,082
0,239	0,789	0,452	0,207
0,493	0,535	0,326	0,631
0,610	0,418	0,172	1

$Kr^0 = 85{,}9$

Die Veränderung der Magnetisierungskurve in der Knickstelle zeigt die nächste Figur. Bei höheren Feldern ist die Magnetisierungskurve die gleiche wie vor dem Ausglühen. **Fig. 7**

Die kleinen Werte für Kr / Kr^0 bei I / I_∞ rund 0,5 besagen, daß die Hysteresis an der Stelle des Knicks am größten ist, während sie auf dem ansteigenden Ast der Magnetisierungskurve bedeutend kleiner ist. Daß die Hysteresisschleife an der Knickstelle am breitesten ist, erkennt

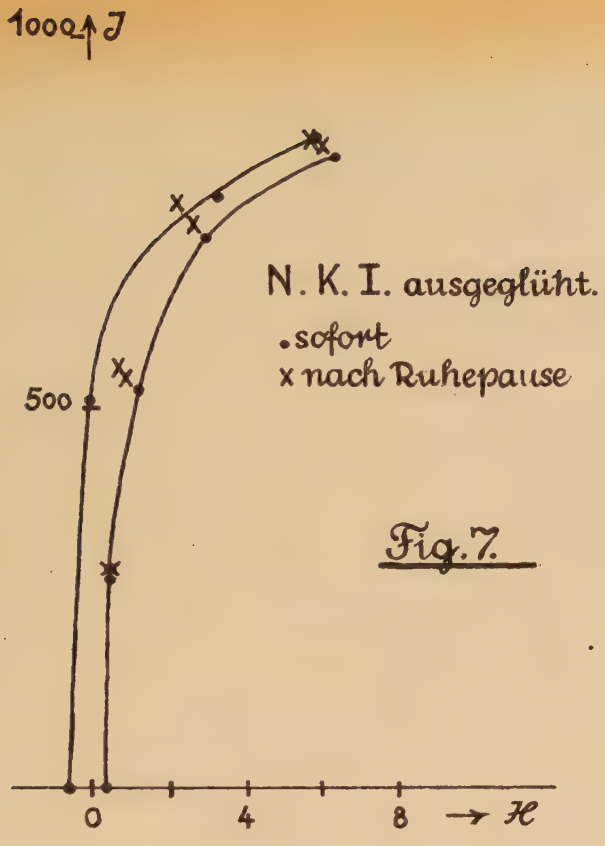


Fig. 7.

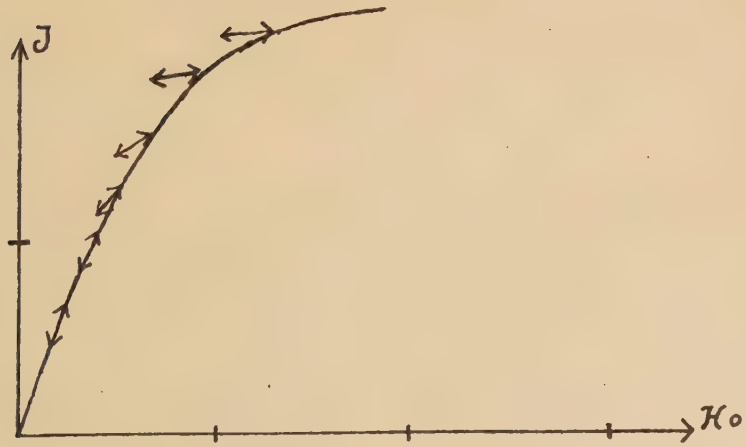


Fig. 8.

man auch aus der Figur 5. Schematisch laufen die absteigenden Aeste etwa so von dem aufsteigenden Ast ab: **Fig. 8**

P. Debye[7]) hat eine theoretische Ableitung der Gans'schen Beziehung gegeben unter der Voraussetzung, daß die Elementarmagnete keine Vorzugsrichtung besitzen. Diese Voraussetzung ist bei Polykristallen jedoch bestimmt nicht erfüllt, daher ist die abweichende Form der Kurve zu verstehen. Die Hysterese wird bedingt durch elastisch-mechanische Kräfte im Innern des Kristalls[8]), die durch geeignete Behandlung des Kristalles zu verringern sind. Analoge Kristalle zeigen kongruente Kurven. Das Ausschlaggebende für die Krümmung der Kurve ist somit, ob eine Vorzugsrichtung der Magnetisierung im Ferromagneticum vorhanden ist, und die Möglichkeit, ihr nachzugehen.

§ 4. Scheinbare Remanenz und Koerzitivkraft.

Wie bereits erwähnt, sind bei den Polykristallen die Hysteresisverluste sehr gering. Da es wegen der Ungenauigkeit des Entmagnetisierungsfaktors nicht möglich ist, die wahre Remanenz exakt zu messen, beschränkte ich mich darauf, die scheinbare Remanenz als Funktion der vorher erreichten Magnetisierung zu untersuchen. Hierbei ist von großer Bedeutung, ob das magnetisierende Feld langsam oder plötzlich auf 0 gebracht wird. Im ersten Fall nimmt die Remanenz R als Funktion der Magnetisierung I zunächst rasch, dann langsamer zu, um schließlich einen konstanten Wert zu erreichen. Diese Kurve wurde für alle Kristalle aufgenommen.

Figur 9/10

Nur der verfestigte Polykristall bildet eine Ausnahme: bei I = 900 beginnt ein abermaliger Anstieg.

Schaltet man das Feld rasch aus, so ist die Remanenz geringer, die Kurvenform ändert sich nicht (N. K. I) oder nach einer anfänglichen Sättigung nimmt die Remanenz wieder ab, (Ausgeglühter N. K. I), während die Werte der Remanenz auch diesmal geringer sind, eine Erscheinung, die auch schon W. Gerlach (l.c.) gefunden hat.

Figur 11.

In ihrer Arbeit über die Anfangspermeabilität stellten E. Gumlich und W. Rogowski[9]) die Regel auf, daß sie mit dem Quotienten R/Hc zunimmt. Eine solche Regel ist für Kr[0] nicht erfüllt wie Tabelle 4 zeigt, wenn man für R die scheinbare Remanenz nimmt.

[7]) P. Debye: Handb. d. Radiologie VI, S. 721, ff. ,1925.
[8]) N. S. Akulov: Zeitschr. f. Phys. 64, S. 559. 1930.
[9]) Ann. d. Phys. 34, S. 235, 1911.

Tabelle 4.

Bezeichnung	R	Hc	R/Hc	Kr^0
Verfestigter Polyk.	13,7	0,57	24	55,7
N. K. I ausg. sofort	26,7	0,40	44,5	58,9
K. mit 2,5 % Streckg.	15,5	0,288	52,0	108,4
N. K. I	15,4	0,29	53,1	174,6
N. K. II	15,0	0,238	63	166,7

Beim ausgeglühten Kristall nahm die Remanenz bei einer mittleren Vormagnetisierung nach der Ruhepause noch zu.

Zusammenfassung.

1. Die von Gans definierte reversible Magnetisierung wurde an Polykristallen untersucht.
2. Während das zur Herstellung der Kristalle benutzte Ausgangsmaterial der Theorie entspricht, ist dies bei Polykristallen nicht der Fall.
3. Allen Kurven der reversiblen Magnetisierung bei Polykristallen ist gemeinsam: zunächst ein mit der Abszissenachse parallel gehendes Stück, dann ein rascher Abfall und schließlich ein ganz langsames Einlaufen in den Punkt (1,0) der Parameterdarstellung, d. h. daß die Magnetisierung bis zu $I/I_\infty \sim 1/2$ Hysterese-frei verläuft, im Knick aber eine Hysterese zeigt.
4. Daneben tritt bei manchen Polykristallen im Bereich des Abfalls von Kr/Kr^0 eine starke Hysterese auch der reversiblen Magnetisierung auf, d. h. im Gebiet des Knicks liegen ganz anomale Hystereseerscheinungen vor.
5. Die Krümmung der Kurve ist individuell verschieden und von der mechanischen und thermischen Vorgeschichte der Probe abhängig.
6. Die Absolutwerte der reversiblen Magnetisierung zeigen Alterungserscheinungen, die funktionale Abhängigkeit von der Magnetisierung jedoch nicht.
7. Eine Zunahme der reversiblen Anfangssuszeptibilität mit dem Quotienten aus Remanenz und Koerzitivkraft ist nicht vorhanden.

Feld langsam ausgeschaltet

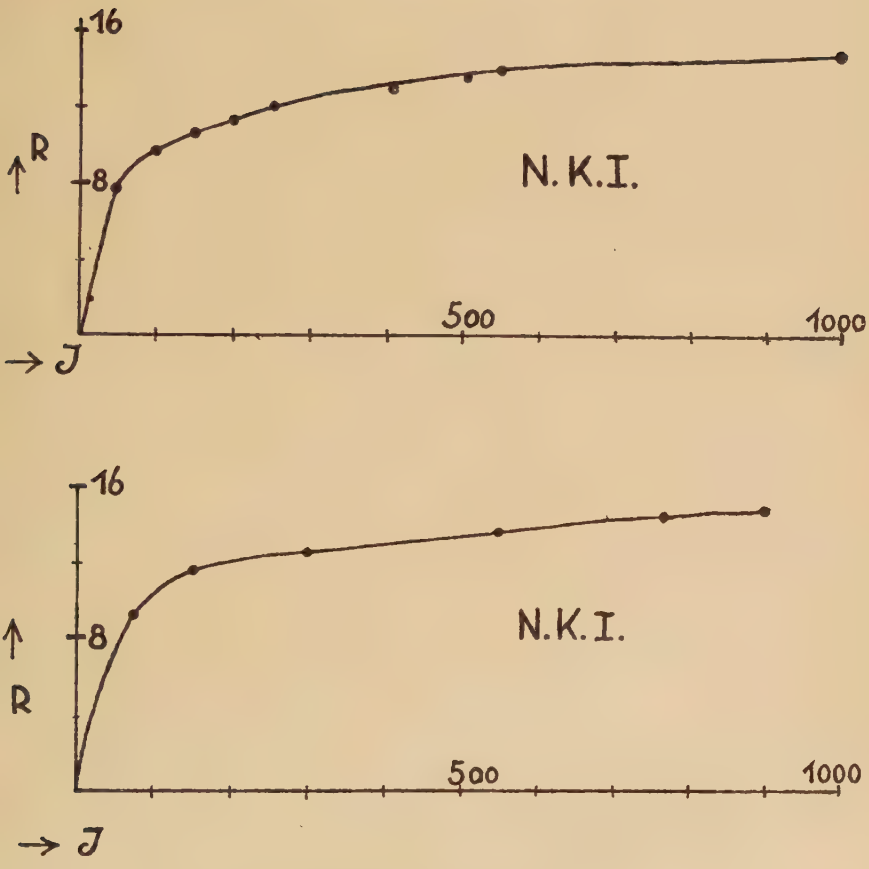


Fig.9.

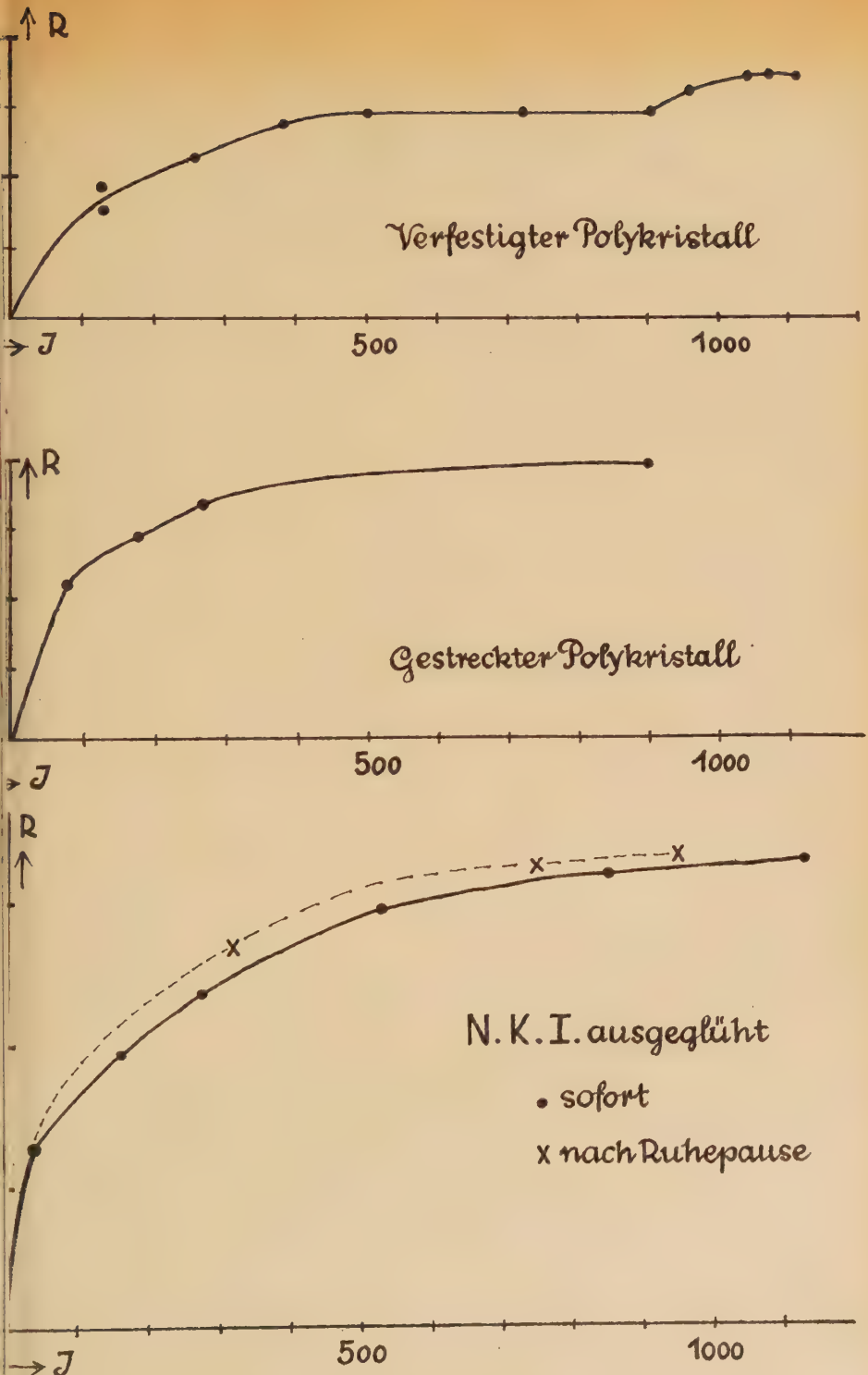


Fig. 10 Feld langsam ausgeschaltet.

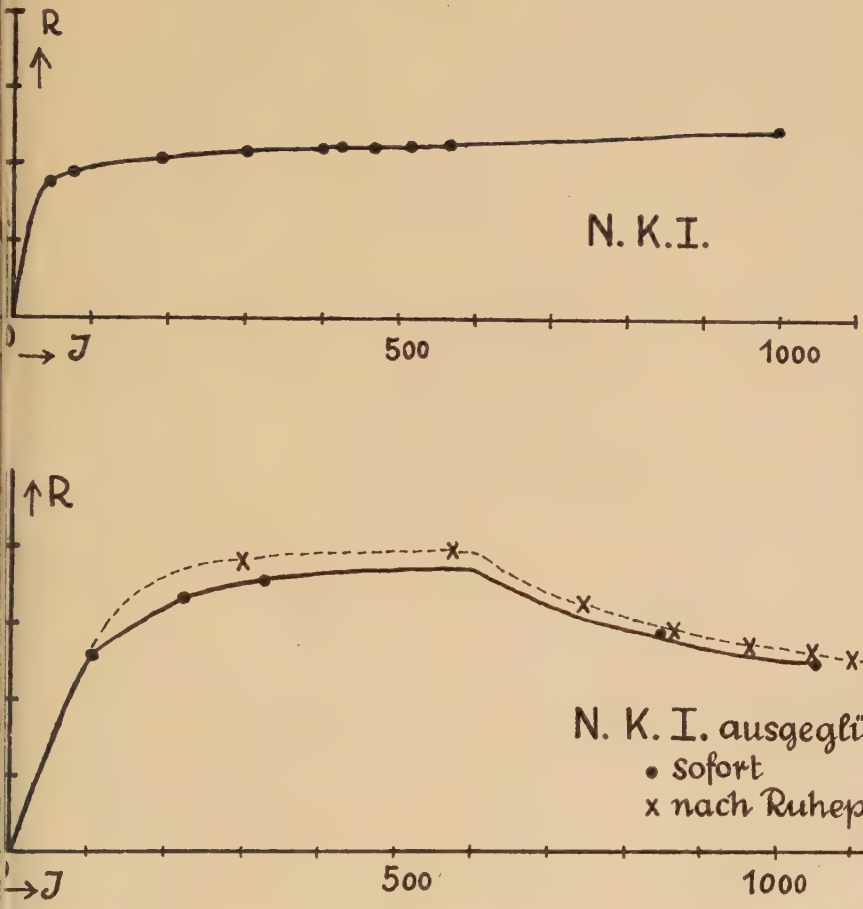


Fig. 11. Feld rasch ausgeschaltet

II. Teil: Temperaturabhängigkeit der reversiblen Magnetisierung.

(Gemessen an vacuumgeschmolzenem Nickel mit ca. 0,8% Mangan.)

§ 1. Problem und Apparatur.

Alle Untersuchungen der r. M. wurden bisher bei Zimmertemperatur ausgeführt. Bei dem Magnetisierungsprozeß spielt aber die Temperatur eine sehr wichtige Rolle. Es zeigt sich, daß bei Temperaturerhöhung ganz prinzipielle Aenderungen der r. M. in ihrer funktionalen Abhängigkeit von der spezifischen Magnetisierung der Volumeneinheit I auftreten, die interessante und wichtige Rückschlüsse auf den Vorgang der Magnetisierung bei der Aenderung der inneren Magnetisierung mit der Temperatur gestatten.

Alle Messungen geschahen wieder mit dem astatischen Magnetometer. Als Probe diente ein vacuumgeschmolzener Nickeldraht mit ca. 0,8 % Mangan der Vaccuumschmelze Hanau. Das Material wurde deshalb gewählt, weil es viel bessere mechanische und magnetische Eigenschaften hat als reines Nickel. Die Dimensionen der Probe waren:

Länge	Durchmesser	Entmagnetisierungsfaktor Mann-Benedicks
15,34 cm	0,5	0,0467

Die Aenderung des magnetisierenden Feldes betrug diesmal 2,056 Gauß, da die Ausschläge für die magnetometrische Messung sonst zu klein wurden. Alle Änderungen waren aber auch bei dieser Größe von $\pm$ H absolut reversibel und reproduzierbar. Die Meßgenauigkeit betrug wieder 0,1 Skalenteile, der Maximaleffekt 5-7 Skalenteile. Zur Heizung diente ein bifilar gewickelter Ofen. Die Messung der Temperatur geschah mit einem Kupfer-Konstantan-Thermoelement. Zunächst wurde die r. M. bei verschiedenen Temperaturen bis zum Curie-Punkt hinaufgemessen und dann wieder vom Curie-Punkt abwärts bis zur Zimmer temperatur. Hierbei zeigten sich ganz bedeutende Unterschiede im Verhalten der r. M. Der Curiepunkt liegt bei 356°. Bei Zimmertemperatur ist $I_\infty = 509$.

§ 2. Die reversible Magnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur.

Bei Zimmertemperatur folgt die r. M. dem Gesetz von Gans-Debye ohne daß eine Hysteresiserscheinung, wie sie Sizoo und Goldschmidt fanden, magnetometrisch innerhalb der Meßgenauigkeit gefunden wurde. Für die graphische Darstellung wurde wieder die Parameterdarstellung benutzt.

Erhöht man jedoch die Temperatur auf 116° C, so zeigt die Kurve eine Veränderung ihrer Form, es tritt Hysterese auf. Bei 200° C ist die Hysterese verschwunden, der Abfall der Kurve ist auch nicht mehr so stark wie bei 116°. Bei 254° und 298° tritt die Hysterese wieder auf. Der Verlauf der Kurve verändert sich ebenfalls dabei. Bei 314°, 326° und 328° hat sich das Kurvenbild völlig verändert, Hysterese tritt nicht mehr auf, die Kurve läuft zunächst

parallel mit der Abszissenachse, biegt dann rasch ab, um schließlich ganz langsam in den Punkt (1,0) hineinzulaufen. Einen ähnlichen Verlauf zeigt auch die r. M. der Polykristalle, doch beginnt der Abfall bei den Kristallen eher.

Figur 12/13.

Tabelle 1.

Zimmertemperatur.

N △ I	△ Ho	I / I_∞	Kr / Kr^0
0,126	1,930	0,015	1
0,119	1,937	0,127	0,942
0,109	1,947	0,224	0,920
0,111	1,945	0,309	0,879
0,106	1,950	0,333	0,832
0,090	1,966	0,405	0,702
0,081	1,975	0,454	0,628
0,082	1,974	0,467	0,635
0,072	1,894	0,494	0,559
0,059	1,997	0,562	0,456
0,058	1,998	0,589	0,499
0,040	2,016	0,625	0,306
0,067	1,989	0,535	0,520
0,076	1,980	0,494	0,592
0,090	1,966	0,436	0,702
0,094	1,962	0,365	0,738
0,103	1,953	0,310	0,813
0,110	1,946	0,221	0,871
0,126	1,930	0	1

$Kr^0 = 1{,}40$

Tabelle 2.

$T = 326^0$

N △ I	△ Ho	I / I_∞	Kr / Kr^0
0,234	1,822	0,315	1
0,157	1,899	0,470	0,646
0,126	1,930	0,537	0,508
0,090	1,966	0,566	0,356
0,066	1,990	0,655	0,258
0,081	1,975	0,597	0,320

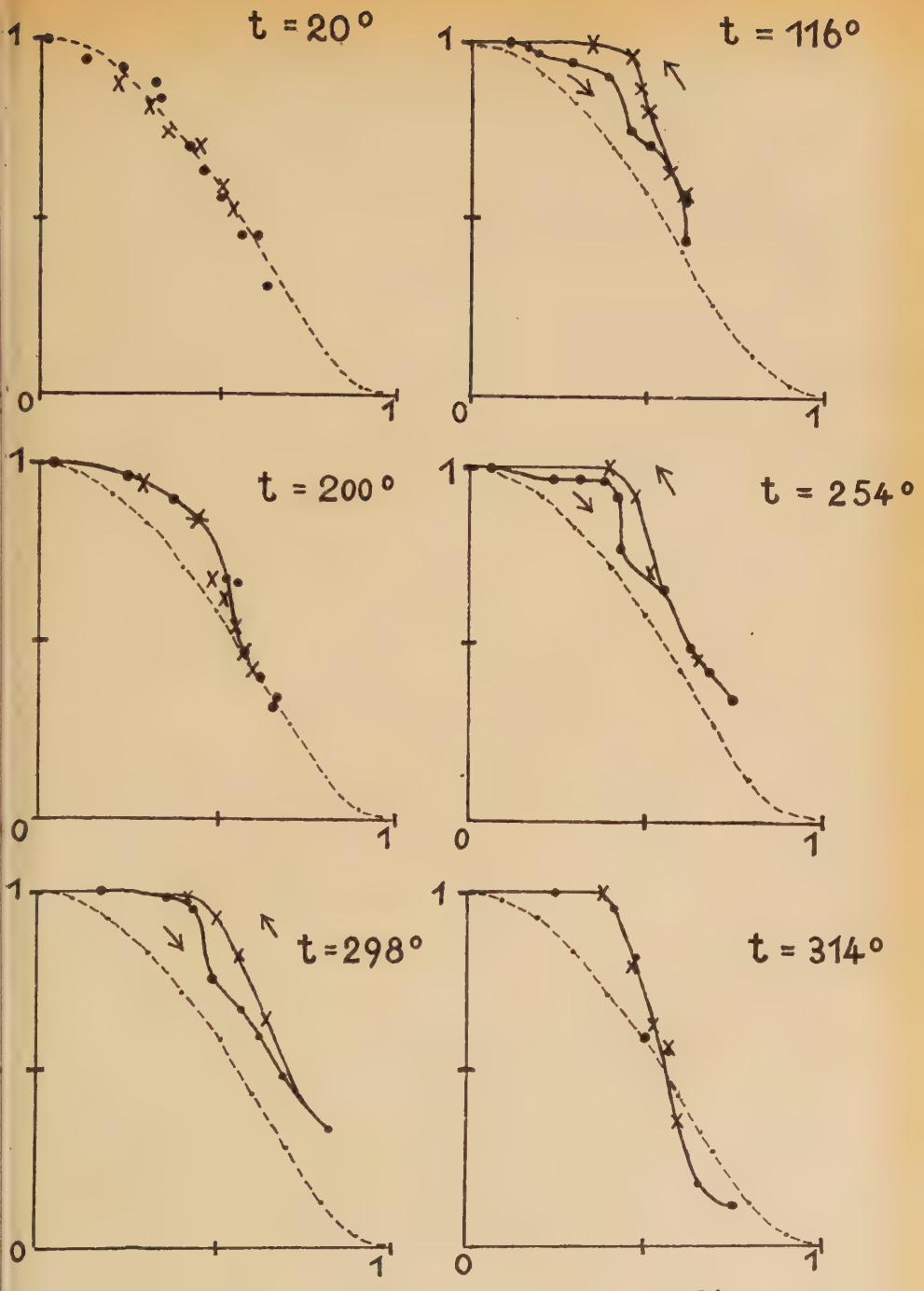


Fig. 12.

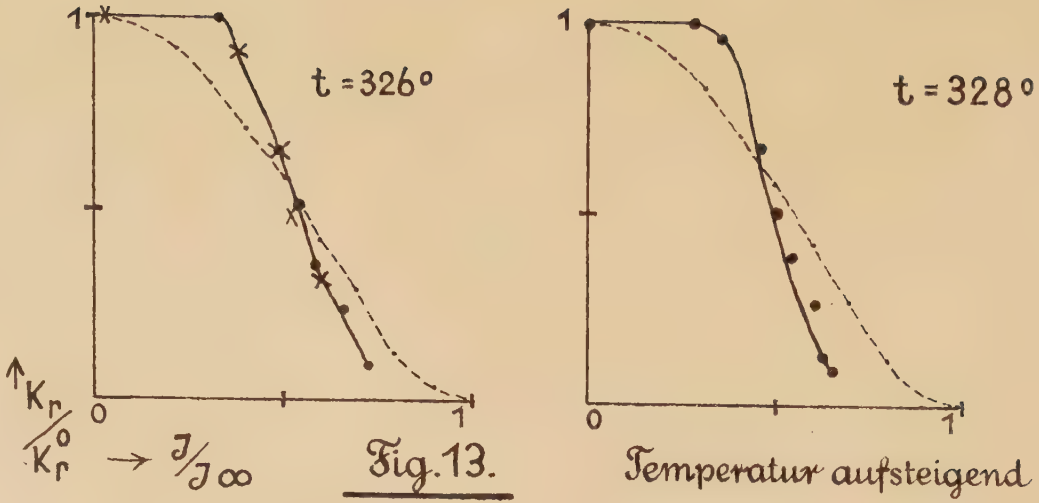


Fig. 13.

N △ I	..Ho	I/I∞	Kr/Kr⁰
0,123	1,933	0,522	0,495
0,159	1,897	0,480	0,653
0,216	1,840	0,378	0,914
0,234	1,822	0,025	1
0,024	2,032	0,718	0,091

$I_\infty = 250$ $Kr^0 = 2{,}75$

Durch die Temperatur werden auch die Absolutwerte von Kr beeinflußt. Bei 116° hat sich der Maximalwert von Kr (Kr^0) nur sehr geringfügig vergrößert. Bei 200° besitzt Kr^0 dagegen ein Maximum. Es ist auffallend, daß gleichzeitig die Hysterese verschwunden ist. Beide Erscheinungen, das Fehlen der Hysterese und das Auftreten eines Maximums für Kr^0 waren reproduzierbar. Bei 254° zeigte Kr^0 ein Minimum, ebenso ist die Hysterese erneut eingetreten. Von nun an steigt der Maximalwert an, um bei 326° ein Maximum zu erreichen. Von hier ab fällt Kr^0 sehr schnell ab. (s. Fig. 15)

Der Curie-Punkt lag bei 356°. Bei Fallen der Temperatur ergab sich bei 298° für die r. M. eine Kurve ohne Hysterese, wie vor der Erreichung des Curie-Punktes erst bei 314° erhalten wurde. Bei 250° tritt wieder Hysterese auf, die Krümmung der Kurve ist ebenfalls wieder bemerkbar geworden. Bei 201° ist die Hysterese wieder verschwunden. Die Krümmung ist hier viel gleichmäßiger geworden. Die Kurve liegt aber noch stark oberhalb der theoretischen. Bei 102° ist das Bild das gleiche. Bei Zimmertemperatur hat sich die Form wieder verändert.

Auch auf Kr^0 hat diese thermische Behandlung der Probe großen Einfluß gehabt. Kr^0 ist überall größer geworden und von 298°-102° liegen alle Werte von Kr^0 angenähert auf einer geraden Linie, bei Zimmertemperatur ist dagegen Kr^0 angestiegen. Zwischen Zimmertemperatur und 102° erreicht Kr^0 somit ein Minimum. **Figur 14/15**

Tabelle 3.
Kr^0 als Funktion der Temperatur.

a) Zimmertemperatur bis Curie-Punkt		b) Curie-Punkt bis Zimmertemperatur	
t	Kr^0	t	Kr^0
20°	1,40	298°	2,85
116°	1,44	250°	2,50
200°	2,13	201°	2,21
254°	1,83	102°	1,49
298°	2,12	20°	1,69
314°	2,13		
326°	2,75		
328°	2,6		

Die Nickelprobe wurde daraufhin im Vacuum bei 600° ausgeglüht und noch einmal dem Temperaturzyclus Zimmertemperatur — Curie-Punkt — Zimmertemperatur unterworfen. Sie zeigte nach dieser Behandlung genau die gleiche Kurve der r. M. wie vor dem Ausglühen nach eben derselben Behandlung.

Kr^0 ist durch das Anlaßen ebenfalls wieder vergrößert worden.

Nach einigen Wochen der Ruhe wurde die Nickelprobe noch einmal untersucht, die Abweichungen von der theoretischen Kurve sind viel geringer geworden.

Figur 16.

Kr^0 hat noch zugenommen.

Für Kr^0 erhielt ich so bei Zimmertemperatur:

Vor Beginn der Messungen	1,40
Nach Ende des Temperaturzyclus	1,69
Nach dem Ausglühen	2,32
Nach Ende des ersten Zyclus	2,466
Nach Ende eines zweiten Zyclus	3,08
Nach Ende eines dritten Zyclus	3,10
Nach der Ruhepause	3,28

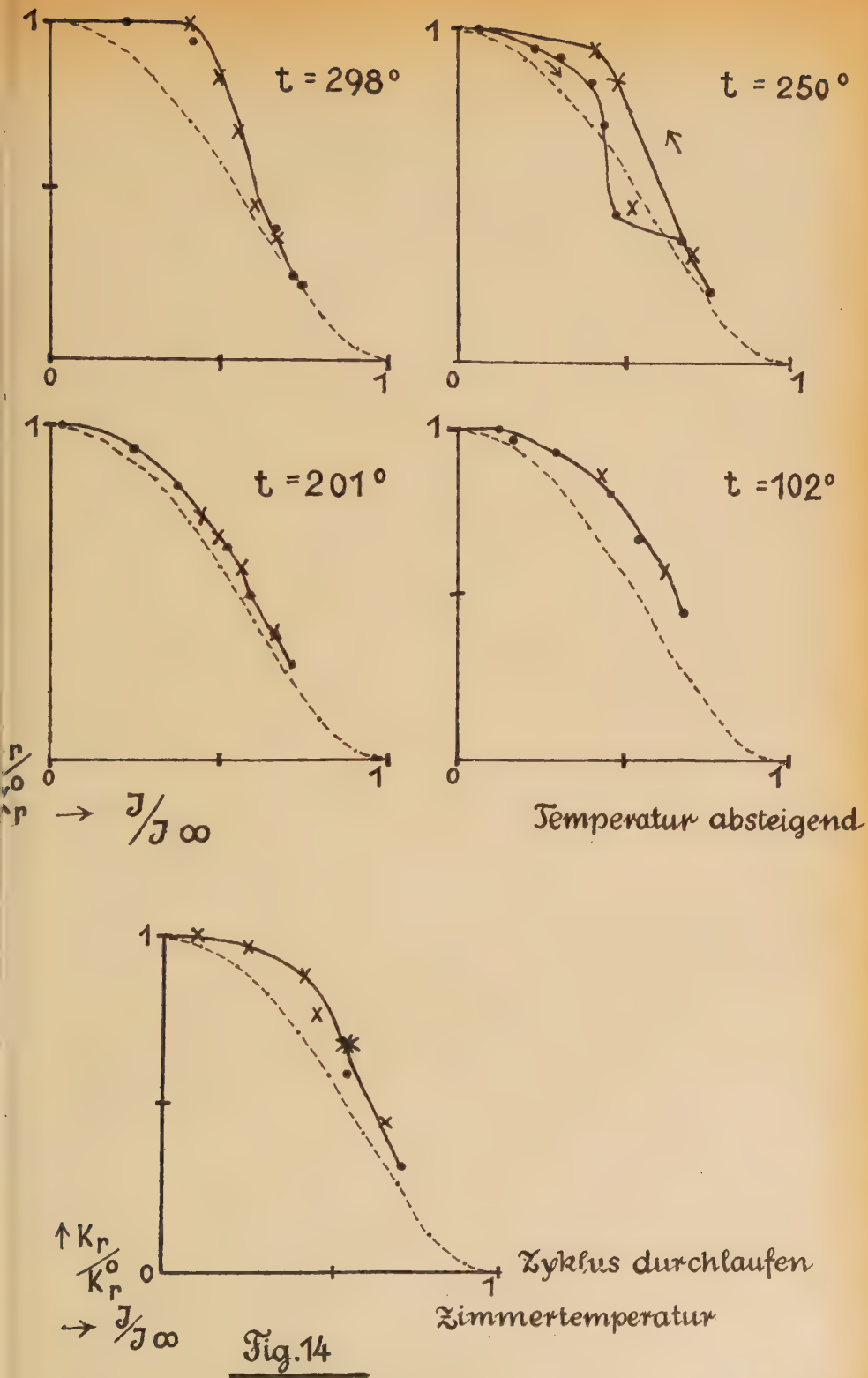
Daß nach einer Ruhepause Kr^0 noch zugenommen hat, fand ich ja auch bei dem ausgeglühten Polykristall N. K. I.

Der Einfluß der Temperatur auf die r. M. ist somit ein recht komplizierter, zumal in dem Gebiet der mittleren Temperaturen. Ist eine allgemeine Richtungsverteilung der Elementarmagnete gemäß der Theorie vorhanden, so ist die r. M. durch die Gleichung I) darstellbar. Bei Temperaturerhöhung wird die „Beweglichkeit" der Elementarmagnete vergrößert, sie können einer durch das äußere Feld bedingten Vorzugsrichtung stattgeben. Darin gehindert werden sie durch Kräfte in der Probe, die erst bei Temperaturen nahe dem Curie-Punkt überwunden werden können. Bei diesen hohen Temperaturen wird die Magnetisierung kristallähnlich, d. h. die Hysterese geht vor allem im Anfangsteil sehr stark zurück.

Über die Natur der Störungen läßt sich experimentell-magnetisch zuvor noch nichts aussagen. Sie müssen aber selber sehr stark durch die Temperatur, jedoch in verschiedenem Maße, beeinflußbar sein, da die durch sie bedingten Abweichungen bei den verschiedenen Temperaturen sehr verschiedener Art sind. Nach Akulow und Becker sind Remanenz und Hysterese eines Ferromagneticums überhaupt nur durch innere Spannungen zu erklären.

§ 3. Totale und reversible Steilheit.

Als totale Steilheit Kt der Magnetisierungskurve in einem Punkt P bezeichnet man die Größe der Neigung der Tangente an die Kurve in diesem Punkte. Die reversible Suszeptibilität Kr wiederum gibt die Neigung der Tangente an den absteigenden Hystereseast mit dem Scheitelpunkt in P in eben diesem Punkte an.



t = 298°
t = 250°
t = 201°
t = 102°
1
0
1
→ J/J∞
Temperatur absteigend
↑ Kr/Kr°
→ J/J∞
Zyklus durchlaufen
Zimmertemperatur

Fig. 14

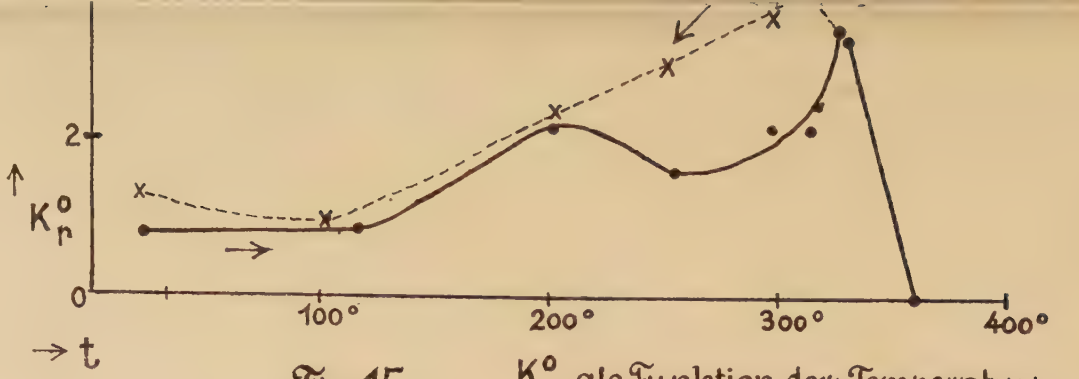
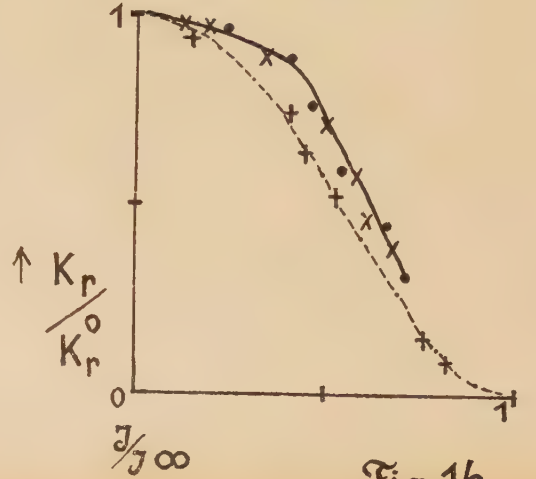


Fig. 15. K_r^o als Funktion der Temperatur



• Vor dem Ausglühen Zyklus durchlaufen

x Nach dem Ausglühen Zyklus durchlaufen

\+ Nach Ruhepause

Fig. 16.

Nach der klassischen Theorie von Ewing ist der Magnetisierungsprozeß aus einem diskontinuierlichen Teil, der durch das Umklappen der Elementarmagnete hervorgerufen wird, und einem kontinuierlichen Teil, bedingt durch die Drehung der Elementarmagnete um ihre Achse zusammengesetzt. Der diskontinuierliche Vorgang tritt besonders im Barkhausen-Effekt [1]) hervor. Bei der r. M. wird es sich nun hauptsächlich um kontinuierliche Aenderungen handeln, wenn auch sicher einige kleinere Barkhausen-Sprünge mit zum Gesamt-Effekt beitragen werden, — jedenfalls wird es qualitativ möglich sein, durch Vergleich der reversiblen Steilheit mit der totalen Steilheit Rückschlüsse auf den diskontinuierlichen Anteil der Magnetisierung zu machen. Aus der aufgenommenen Magnetisierungskurve wurde graphisch die totale Steilheit ermittelt und der Quotient Kt Kr der beiden Größen als Funktion des wahren Feldes Ho aufgetragen. Die Temperatur ist wieder Parameter.

Figur 17.

Allen Kurven ist gemeinsam, daß dieser Quotient für Ho = Hc (Koerzitivkraft) sehr groß ist, dann aber schnell abnimmt und mit höheren Feldern Ho zu eins wird, d. h. aber, daß der Hauptanteil der diskontinuierlichen Vorgänge auf den Anstieg der Magnetisierungskurve beschränkt ist, und mit Annäherung an die Sättigung verschwindet. Direkte Messungen des diskontinuierlichen Anteils aus dem Barkhausen-Effekt von F. Preisach [2]) ergaben genau das Gleiche.

Durch die Erhöhung der Temperatur wird der Anteil der Diskontinuitäten an der Gesamtmagnetisierung vermindert. In dem graphischen Bilde ist dieser Anteil qualitativ gegeben durch die von der Abszissenachse und der Kurven eingeschlossenen Fläche. Die Fläche nimmt aber mit der Temperatur, wie deutlich erkennbar, immer mehr ab. Der Wert eins für Kt/Kr wird bei immer niederen Feldstärken Ho erreicht, nur bei 254° findet man eine Ausnahme. Bei dieser Temperatur zeigt Kr° entsprechend ein Minimum. Messungen von Gerlach und P. Certes [3]) über die Temperaturabhängigkeit des Barkhausen-Effektes zeigen direkt die Abnahme des diskontinuierlichen Anteils mit der Temperatur. Bei rückläufiger Aenderung der Temperatur vom Curie-Punkt bis zur Zimmertemperatur ist der Quotient Kt/Kr kleiner als beim Anstieg bei derselben Temperatur. Nur bei t = 201° ist eine Ausnahme. Hier sind die Werte für Kt/Kr im Bereich von Ho = 10-30 Gauß größer als vorher. Dem entspricht, daß Gerlach und Certes bei ihren Messungen über die Temperaturabhängigkeit des Barkhausen-Effektes — ebenfalls rückläufig und an Nickel gemessen — bei dieser Temperatur und im Bereich dieser Feld-

[1]) H. Barkhausen: Phys. Z. S., Bd. 20, S. 401, 1919.
[2]) Ann. d. Phys. 3, S. 737, 1929.
[3]) Z. S. f. Phys. 4, S. 383, 1921.

stärken ebenfalls ein Maximum feststellten. Nach dem Ausglühen und Durchlauf des Temperaturzyclus ist der diskontinuierliche Anteil wieder verkleinert worden.

§ 4. Remanenz, Koerzitivkraft und Hystereſisverluſte.

Durch die Temperaturerhöhung nahm die wahre Remanenz die Koerzitivkraft und die Hystereſisverluſte in bekannter Weiſe ab.

Tabelle 4.

t	R	Hc	%*	HV**	R/Hc	Kr^0
20°	191	21	37,5%	$2{,}4\ 10^4$	9,1	1,397
116°	182	16	37,8%	1,67	11,4	1,416
200°	158	12	36,7%	1,10	13,15	2,127
254°	142	9	37,4%	0,79	15,67	1,831
298°	116	6,4	36,8%	0,506	18,1	2,123
314°	92	4,8	32,9%	0,353	19,1	2,133
326°	67	3,8	28,9%	0,131	17,9	2,750
328°	60	3,4	23,6%	0,105	17,6	2,630
298°	110	5,4	35,2%	0,394	20,3	2,855
250°	143	9	37,2%	0,858	16	2,505
201°	158	11	36,7%	1,13	14,4	2,214
102°	186	16	38,4%	1,72	11,7	1,490
20°	210	20	41,3%	2,42	10,5	1,690

* Remanenz in Prozenten der jeweiligen Sättigung.
** Hystereſisverluſte

Figur 18.

Die Werte für die Remanenz ſind aus der Magnetiſierungskurve interpoliert. Durch die Temperaturbehandlung hat R zugenommen und Hc abgenommen.

In der Tabelle ſind ferner die Werte für den Quotienten R/Hc und für die reverſible Anfangsſuſceptibilität Kr^0 aufgetragen. Es iſt zu erkennen, daß die Regel von Gumlich und Rogowski für die gleichen Temperaturen gilt: Kr^0 nimmt bei gleichen Temperaturen mit den Quotienten R/Hc zu. Eine lineare Beziehung $Kr^0 = a\,R/Hc$ beſteht jedoch ebenfalls nicht.

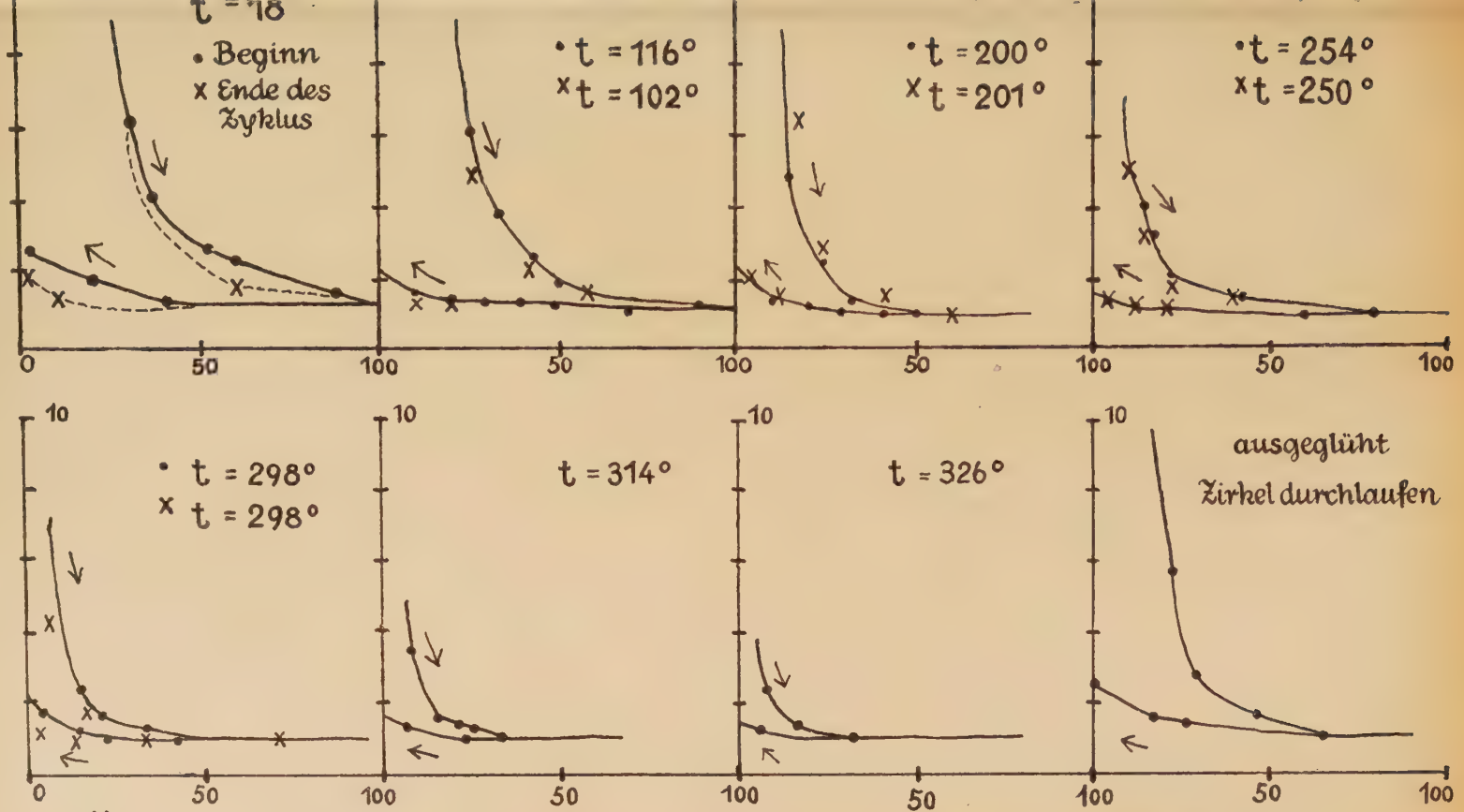


Fig. 17.

• Temperatur aufsteigend.
x Temperatur absteigend.

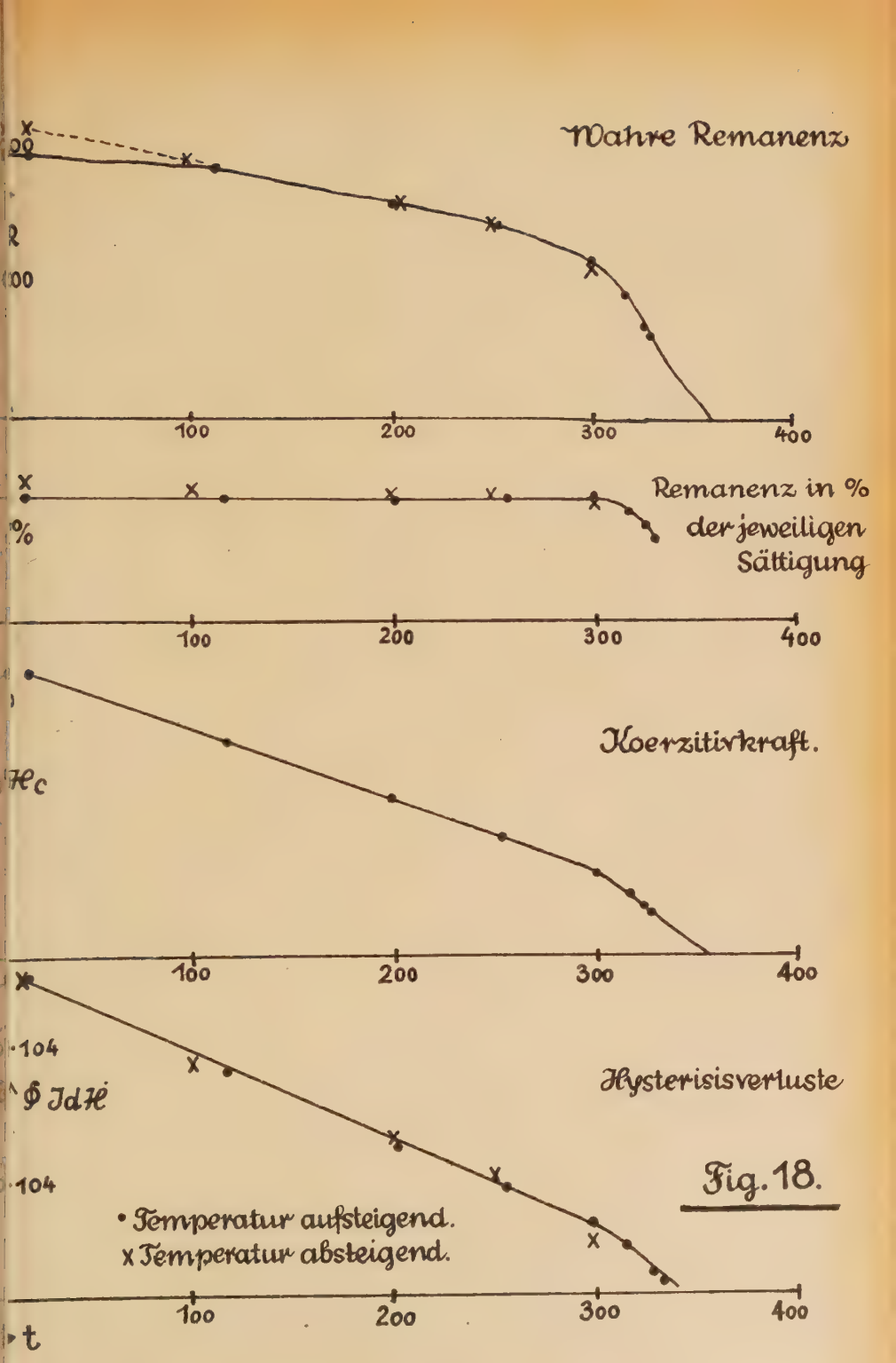

Wahre Remanenz
R
100
200
300
400
%
Remanenz in %
der jeweiligen
Sättigung
100
200
300
400
Hc
Koerzitivkraft.
100
200
300
400
104
∮ JdH
Hysterisisverluste
104
• Temperatur aufsteigend.
x Temperatur absteigend.
100
200
300
400
t

Fig. 18.

Zusammenfassung.

1. Es wurde die Temperaturabhängigkeit der reversiblen Magnetisierung an Nickel mit ca. 0,8 % Mangan untersucht.

2. Bei Zimmertemperatur, frisch aus der Schmelze, entspricht die Probe der Theorie von Gans-Debye.

3. Bei höheren Temperaturen treten jedoch erhebliche Abweichungen von der Theorie, darunter eine Hysterese auf. Der Grad der Abweichungen von der Theorie ist bei verschiedenen Temperaturen einheitlich. Es tritt eine Kurve auf, wie sie in ähnlichem Verlauf an Polykristallen gemessen wurde.

4. Geht man mit der Temperatur wieder zurück, so bleibt eine abweichende Form der Kurve ohne Hysterese bei Zimmertemperatur erhalten. Dieselbe Kurve wurde nach dem Ausglühen des Stabes auf 600° und Durchlauf des Temperaturzyclus wieder gefunden, wurde aber nach einer Ruhepause von einigen Wochen nicht wieder erhalten, die Abweichungen in der theoretischen Kurve waren geringer geworden, d. h. durch Erhitzung stellt sich ein kristallähnlicher Zustand ein, der dann im Laufe der Zeit wieder zerfällt.

5. Denkt man sich die reversible Änderung der Magnetisierung hauptsächlich durch den kontinuierlichen Anteil der Magnetisierung bedingt, so ist das Verhältnis von totaler zur kontinuierlichen Steilheit bei niederen Feldern am größten, um mit Annäherung an die Sättigung den Wert eins zu erreichen, d. h. der diskontinuierliche Anteil der Magnetisierung ist auf dem ansteigenden Ast der Magnetisierungskurve am stärksten, bei Näherung an die Sättigung ist dagegen der kontinuierliche Anteil überwiegend.
Durch Temperaturerhöhung nimmt der diskontinuierliche Anteil ab.

6. Bei gleicher Temperatur nimmt die reversible Susceptibilität mit dem Quotienten R/Hc zu.

Herrn Professor Dr. Gerlach danke ich herzlich für das lebhafte Interesse, das er meiner Arbeit entgegenbrachte und für manchen wertvollen Ratschlag. Es ist mir ferner ein Bedürfnis Herrn Professor Dr. Geiger für die bereitwillige Ueberlassung seiner Institutsmittel, wodurch die Durchführung dieser Untersuchungen erst ermöglicht wurde, herzlich zu danken.

Lebenslauf.

Ich, Jürgen, August, Friedrich, Jaspar, Richard, Anton von Harlem wurde am 17. Mai 1907 zu Schwerin i. Meckl. als Sohn des verst. Geheimen Kammerrates Georg von Harlem und seiner Ehefrau Annemarie geb. Witte geboren und bin evangelischen Bekenntnisses. Ich besuchte das Gymnasium Fridericianum meiner Vaterstadt und widmete mich nach dem bestandenen Abitur an den Universitäten München, Helsingfors und Tübingen dem Studium der Physik und Mathematik.